

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Využití nepilotovaných leteckých prostředků v letecké radiometrii

Bakalářská práce

Jiří Dědek

Praha 2019

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Geotechnologie



**Jiří Dědek**

Využití nepilotovaných leteckých prostředků v letecké radiometrii  
An application of unmanned aerial vehicles in airborne radiometry

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Ondřej Šálek

Praha 2019

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne: 11.01.2019

podpis:

## Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím bezpilotních leteckých prostředků pro radiometrický průzkum. Cílem práce je posouzení charakteristik čtyř vybraných bezpilotních leteckých prostředků a parametry jejich detektorů v porovnání s klasickým leteckým a pozemním radiometrickým průzkumem. Konkrétně se jedná o hexakoptéru „Kingfisher“ s detektorem BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) s objemem 0,2 l, oktokopty „Arducopter“ s detektorem CZT ( $\text{CdZnTe}$ ) s objemem 1  $\text{cm}^3$ , helikoptéru „Yamaha RMAXG1“ s detektorem NaI(Tl) o objemu 1,8 l a vzducholod’ „ACC15X“ s detektorem NaI(Tl) o objemu 2,7 l. U jednotlivých leteckých aparatur je porovnávána nosnost, citlivost detektorů, rychlost letu, výška letu, doba letu na jednu nádrž paliva nebo na jedno nabití baterií a odolnost proti větru. Z citlivosti detektoru dané UAV aparatury, pracovní výšky a rychlosti letu je odvozena předpokládaná kvalita radiometrických dat, která je porovnávána s typickou kvalitou dat klasických metod měření.

Srovnatelné kvality dat s klasickým leteckým měřením ve výšce 80 m a při rychlosti 50 m/s lze dosáhnout za pomoci tří vybraných bezpilotních leteckých aparatur za předpokladu letu v konkrétní pracovní výšce a při určité rychlosti. Jedná se o hexakoptéru „Kingfisher“ s detektorem D230A ve výšce 40 m, při rychlosti 1 m/s, helikoptéru „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) o objemu 1,8 l ve výšce 40 m a při rychlosti 5 m/s a vzducholod’ „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) o objemu 2,7 l ve výšce 80 m a při rychlosti 5 m/s.

Zvažována byla rovněž efektivita měření jednotlivých měřících aparatur pomocí doby potřebné ke změření 50 km profilu. Efektivita měření posuzované vzducholodi a helikoptéry je odhadována přibližně o řád nižší než u klasického leteckého měření. Multikoptéry by uvažovaný profil měřily téměř o dva řády delší dobu.

## Abstract

This thesis deals with the use of Unmanned Aerial vehicles (UAV) in radiometric survey. The main goal of this work is to review characteristics of four selected UAV and parameters of employed detectors compared to the classical airborne and ground radiometric survey. Four selected UAV were assessed, hexacopter “Kingfisher” with the detector BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) of the volume  $0,2 \text{ cm}^3$ , the octocopter „Arducopter“ with the  $1 \text{ cm}^3$  CTZ ( $\text{CdZnTe}$ ) detector, helicopter „Yamaha RMAXG1“ with  $1,8 \text{ l}$  NaI(Tl) detector and airship „ACC15X“ with  $2,7 \text{ l}$  NaI(Tl) detector. Payload capacity, detector sensitivities, flight speed, flight altitude, endurance for one charged battery or full fuel tank and wind resistance were compared among the mini-airborne instruments. The estimation of UAV radiometric data quality was derived from the sensitivity of the detectors, the flight altitude and flight speed. Estimated UAV radiometric data quality was compared to classical airborne and ground typical radiometric data quality.

Three selected UAV with a certain altitude and flight speed would achieve a comparable data quality as a classical airborne survey in the altitude of  $80 \text{ m}$  and flight speed of  $50 \text{ m/s}$ . Specifically it is hexacopter „Kingfisher“ with a scintillation detector D230A at altitude of  $40 \text{ m}$  and speed of  $1 \text{ m/s}$ , helicopter “RMAXG1” with a  $1,8 \text{ l}$  NaI(Tl) detector flying at altitude of  $40 \text{ m}$  and speed of  $5 \text{ m/s}$  and airship “ACC15X” with a  $2,7 \text{ l}$  NaI(Tl) detector flying at altitude of  $80 \text{ m}$  and at speed of  $5 \text{ m/s}$ .

The measurement efficiency of each UAV instrument was also considered through the time needed to measure  $50 \text{ km}$  long profile. The efficiency of the selected unmanned airship and helicopter is estimated approximately ten times lower compared to classical airborne survey. Multicopters would measure the considered profile almost hundred times longer.

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Radioaktivita a zdroje radioaktivity .....	2
3. Měření gama záření .....	2
3.1. Detektory .....	2
3.1.1. Geiger-Müllerova počítací trubice.....	2
3.1.2. Scintilační detektory .....	3
3.1.3. Polovodičové detektory .....	3
3.2. Měření a zpracování radiometrických dat .....	4
3.2.1. Měření úhrnné gama aktivity.....	4
3.2.2. Gamaspektrometrie.....	4
3.2.3. Kalibrace radiometrických přístrojů.....	6
3.2.4. Zdroje radiačního pozadí.....	6
3.2.5. Chyby měření v radiometrii.....	7
4. Klasické metody radiometrického průzkumu .....	7
4.1. Pilotované letecké prostředky.....	7
4.2. Pole gama záření nad povrchem země a výška letu .....	8
4.3. Pozemní průzkum .....	10
5. Nepilotované letecké prostředky pro radiometrický průzkum .....	10
5.1. Hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A od firmy „Georadis“ .....	13
5.2. Oktokoptéra „Arducopter“ s detektorem GR1 od firmy „Kromek“ .....	14
5.3. Helikoptéra „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl).....	14
5.4. Vzducholod' „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) .....	16
6. Posouzení možností využití bezpilotních leteckých prostředků pro měření radioaktivního záření... 18	
6.1. Letové a detekční charakteristiky jednotlivých měřících aparatur .....	18
6.1.1. Hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A .....	21
6.1.2. Oktokoptéra „Arducopter“ s detektorem GR1 .....	22
6.1.3. Helikoptéra „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl).....	22
6.1.4. Vzducholod' „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) .....	23
7. Závěr.....	24
8. Seznam obrázků a tabulek .....	25
9. Literatura .....	27

## 1. Úvod

Cílem této práce je zhodnotit možnosti použití bezpilotních leteckých prostředků pro radiometrická měření. Tyto prostředky, jejichž anglický název je „Unmanned Aerial Vehicle“, zkráceně UAV, se postupem času stávají doplňkem ke klasickým metodám měření při detekci radioaktivního záření. V rámci několika výzkumů byly posouzeny jako vhodný prostředek k měření umělé (Martin et al., 2015; MacFarlene, 2014) i přírodní radioaktivity (Šálek et al., 2018).

Tato práce se bude zabývat otázkou, zdali pomocí čtyř vybraných bezpilotních měřících aparatur s uvažovanými leteckými parametry lze dosáhnout srovnatelné kvality dat jako s klasickou leteckou aparaturou a dynamickým pozemním měřením. Konkrétně se bude jednat o oktokopty „Arducopter“ s detektorem GR1, která byla v minulosti použita ke zjišťování úrovně kontaminace v místech těžby uranové rudy v rámci studie Martin et al. (2015). Další měřící aparaturou bude hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A, za pomoci které byla měřena anomálie způsobená zvýšeným množstvím uranu u obce Třebsko (Šálek et al., 2018). Dále bude uvažována helikoptéra „RMAXG1“. Tato bezpilotní helikoptéra s detektorem  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$  byla v minulosti použita k měření úrovně radiace po havárii jaderné elektrárny Fukušima (Sanada, Torii, 2015). V této práci bude uvažována s detektorem  $\text{NaI(Tl)}$  o vhodné hmotnosti, který je vhodnější pro měření přírodní radioaktivity. Posledním bezpilotním prostředkem bude vzducholod’ „ACC15X“ s uvažovaným detektorem  $\text{NaI(Tl)}$ , která prozatím nebyla použita pro žádná radiometrická měření. Díky svým leteckým parametrům by se však v budoucnu mohla stát vhodným prostředkem pro měření radioaktivity.

## 2. Radioaktivita a zdroje radioaktivity

Existuje několik forem radioaktivního záření. Jedním z nich je **záření alfa**. Jedná se o proud kladně nabitých alfa částic. Toto záření má velice malou průchodnost. Ve vzduchu dosahuje prvních centimetrů a při průchodu pevnými látkami prvních setin milimetrů (Mareš et al., 1979). Další druh záření je **záření beta**. Jedná se o proud záporně nabitých elektronů dosahujících až rychlosti světla. Doběh záření beta s energií 1 MeV ve vzduchu je 3,9 m (Mareš et al., 1979). Dalším typem záření je **záření gama**. Jde o elektromagnetické záření šířící se rychlostí světla. Doběh záření gama z přírodních radionuklidů dosahuje ve vzduchu 700 m a v horninách až 1 m (Mareš et al., 1979).

Hlavním úkolem bezpilotních prostředků v radiometrii je detekce záření gama. Toto záření je způsobeno radioaktivními izotopy některých prvků. Největší vliv na přírodní radioaktivitu mají hlavně izotopy draslíku  $^{40}\text{K}$ , thoria  $^{232}\text{Th}$ , uranu  $^{238}\text{U}$ , uranu  $^{235}\text{U}$  a dceřiné izotopy v jejich rozpadových řadách (Mareš et al., 1979). Mimo přírodní radionuklidy známe i umělé radionuklidy, kterých existuje více než 800 (Mareš et al., 1979). Vznikají obvykle ve spojitosti s jadernými výbuchy, popřípadě jako důsledek testování jaderných zbraní či nehod jaderných elektráren (Mareš et al., 1979). V přírodě se umělé radionuklidy vyskytují jako radioaktivní spad.

## 3. Měření gama záření

### 3.1. Detektory

#### 3.1.1. Geiger-Müllerova počítací trubice

V radiometrii se používá celá řada detektorů. Jako příklad lze uvést **GM počítací trubice** (Mareš et al., 1979). Ty pracují na principu zvyšující se ionizace v elektrickém poli mezi katodou a anodou přístroje. Při dopadu ionizující částice do prostoru GM počítače dojde k ionizaci plynu v počítači a následnému toku elektrického proudu. Tento proud se na výstupu počítá jako napěťový impuls. U detekce gama záření se využívá ionizačních účinků elektronů uvolněných z katody po dopadu kvant gama. Účinnost GM počítačů pro detekci záření gama je přibližně jen 1 % (Mareš et al., 1979). Pro nízkou účinnost jsou GM detektory ve spojení s UAV vhodné spíše pro průzkum intenzity radiace při záchranných akcích v případě nouzových radiačních situací, kde je pravděpodobné, že radiace bude dosahovat vysokých hodnot (Bogatov et al., 2013).



### 3.1.2. Scintilační detektory

Další typ detektoru je založen na metodě, která využívá scintilační krystaly (Šilar, 1960). V radiometrii je detekce energetických kvant pomocí scintilačních materiálů jedna z nejpoužívanějších detekčních metod k měření intenzity záření (Sanada, Torii, 2015; Minty, 1997; IAEA, 2003). Hlavní složkou je chemická sloučenina, která vytváří scintilační krystal. Po vniknutí ionizující částice do scintilační látky dojde ke ztrátě její energie. Tato energie je spotřebována na ionizaci nebo excitaci molekul scintilátoru (Šilar, 1960). Následně vzniklá ionizační energie je převedena na energii fotonů. Aby bylo možné registrovat fotony, je třeba je převést na elektrický impuls o vysoké amplitudě (Šilar, 1960). Emitované scintilační fotony dopadají na fotokatodu fotonásobiče. Ta následně produkuje proud elektronů, které jsou urychlovány ve směru rostoucího napětí mezi kaskádou dynod. Počet elektronů se zvyšuje až k poslední elektrodě anodě ve fotonásobiči (Mareš et al., 1979). Existuje přímá úměra mezi velikostí impulsu na výstupu a energií detekovaného gama záření (Mareš et al., 1979). Těchto vlastností se využívá pro spektrometrii gama záření v mnoha různých verzích detektorů. Mezi běžně používané scintilační látky pro detekci gama záření patří NaI(Tl) a BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ). Mezi méně často používané patří například  $\text{LaBr}_3\text{Ce}$  nebo  $\text{CsI(Tl)}$ .

### 3.1.3. Polovodičové detektory

Dále se používají polovodičové detektory. Ty pracují na principu upraveného polovodiče, který je zapojen do elektrického obvodu. Po dopadu částice do prostoru detektoru dojde k průtoku proudu, a tedy i k napěťovému impulsu. Polovodičové detektory mají výbornou rozlišovací schopnost. Jako příklad lze uvést HPGe. Hlavní nevýhodou, kvůli které tento detektor nelze využít pro potřeby bezpilotního průzkumu je, že je třeba jej chladit, a to obvykle tekutým dusíkem, což znamená vysokou hmotnost aparatury (Mareš et al., 1979). Vhodným polovodičem je CdZnTe. Jedná se o slitinu kadmia, zinku a teluru s hustotou okolo  $5,8 \text{ g/cm}^3$ . Tento detektor pracuje za pokojové teploty a zvládne zaregistrovat gama záření v širokém energetickém intervalu od 10 keV až po 7 MeV (Rasolonjatovo et al., 2000). Tyto detektory mají typicky malý objem. Například MacFarlane et al. (2014) uvádí použití CdZnTe detektoru s objemem  $1 \text{ cm}^3$ .

Jiným příkladem detektoru využívající kombinaci pixelového čipu a substrátu CdZnTe je gama kamera (Carrel et al., 2010). Například Carrel et al. (2010) zmiňuje gama kameru od výrobce GAMPIX s hmotností do 1 kg, a tedy použitelnou pro měření s UAV. Gama kamera detekuje pouze energie v rozmezí od 60 keV do 1,3 MeV (Carrel et al., 2012). Tento detektor

je tudíž vhodný spíše pro vyhledávání kontaminací způsobených umělými radionuklidy, a to zejména ve vnitřním prostředí (Carrel et al., 2012).

### *3.2. Měření a zpracování radiometrických dat*

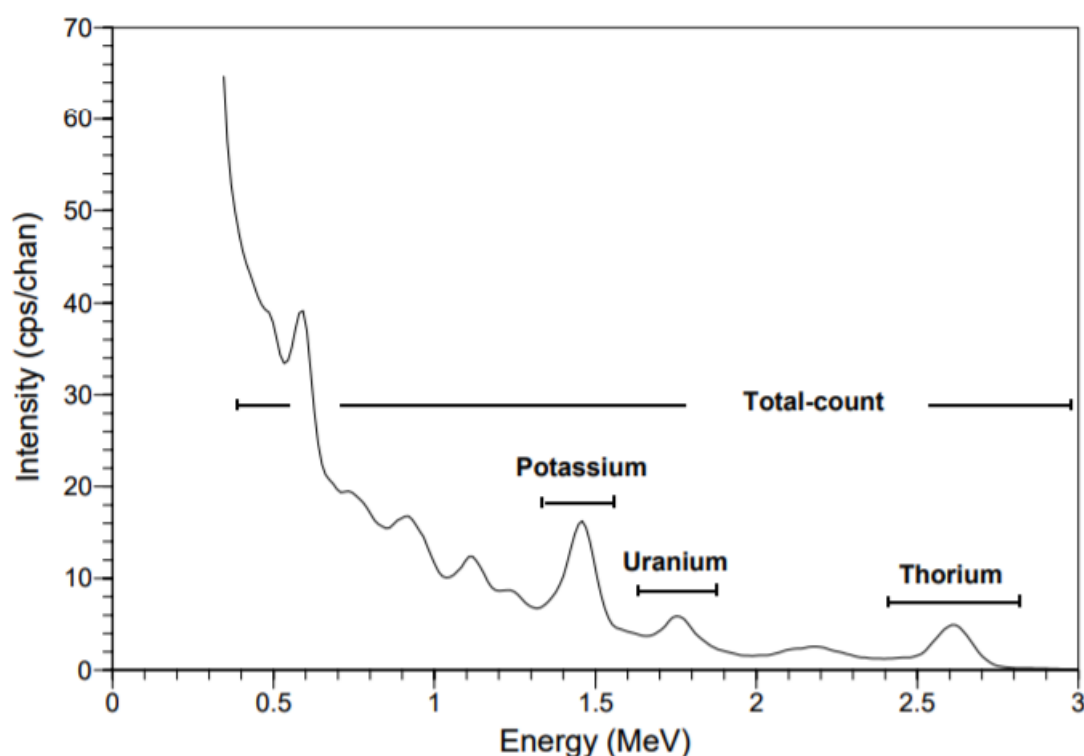
#### *3.2.1. Měření úhrnné gama aktivity*

Jednou z možných metod pro detekci gama záření je registrovat úhrnnou gama aktivitu, při které se registrují veškerá gama kvanta s vyšší energií, než je diskriminační úroveň radiometru. Naměřená hodnota závisí na koncentracích radioaktivních izotopů v prostředí. Úhrnná gama aktivita se obvykle udává v jednotkách četnosti impulsů (imp/s) nebo v jednotkách dávkového příkonu gama záření ve vzduchu v nGy/h (Mareš et al., 1979; IAEA, 2003).

#### *3.2.2. Gamaspektrometrie*

V případě, že je cílem zjistit, od kterého radioizotopu záření pochází, používá se měření rozložení spektra gama energií (Finnerty, et al., 2010). Spektrometr zaregistruje průchody gama záření a měří četnost impulsů pro daný energetický kanál (Mareš et al., 1979). Tím lze zjistit intenzitu jednotlivých peaků energií charakteristických pro zdrojové radionuklidy (Grasty, Minty, 1995). Draslík je detekován podle jediného píku 1461 keV. Uran je detekován podle energie 1764 keV emitovanou  $^{214}\text{Bi}$ , který je členem přeměnové řady  $^{238}\text{U}$ . Thorium je detekováno podle energie 2615 keV náležející izotopu  $^{208}\text{Tl}$  thoriové přeměnové řady.

IAEA (1991) doporučuje volit intervaly energií pro zájmová energetická okna přírodních radionuklidů pro  $^{40}\text{K}$  1370 – 1570 KeV, pro  $^{214}\text{Bi}$  1660 - 1860 keV a pro  $^{208}\text{Tl}$  2410 - 2810 keV. Výsledkem gama spektrometrického měření je spektrum registrovaných energií (Grasty, Minty, 1995). Příkladné spektrum přírodního gama záření registrovaného pomocí scintilačního detektoru je vyobrazeno na obr. 1 (IAEA, 2003).



Obr. 1: Spektrum energií kvant gama pomocí letecké spektrometrie. Na vertikální ose je zaznamenáno množství naměřených impulzů jednotlivých energií, které jsou vyobrazeny na ose horizontální (IAEA, 2003).

#### Stabilizace spektra gama záření

Vlivem změn teploty a zesílení signálu v přístroji dochází k posunu spektra na ose energií. Aby bylo měření přesné, je třeba spektrum stabilizovat. Ideální je pro tuto potřebu zdroj izotopu  $^{137}\text{Cs}$ . Tomuto izotopu odpovídá pík 662 keV. Některé moderní přístroje se stabilizují pomocí přirozeně se vyskytujících přírodních izotopů. Jako příklad lze uvést izotop draslíku  $^{40}\text{K}$ , kterému odpovídá energetická hodnota 1460 keV, popřípadě častěji používaný izotop Thalia  $^{208}\text{Tl}$  s energetickou hodnotou 2615 keV (Grasty, Minty, 1995). Aby došlo k co nejmenšímu snížení posunu spektra, lze použít tepelně stabilizovaný obal. Tento obal napomáhá nejen proti dopadu počasí na ovlivnění výsledků, ale i ke zvyšování rozlišovací schopnosti spektrometru (Grasty, Minty, 1995).

### 3.2.3. Kalibrace radiometrických přístrojů

Detektory je také nutno kalibrovat, a to za účelem převádění naměřených dat na fyzikální jednotky. Kalibrace se provádí na kalibračních základnách, kde je měřeno gama spektrum na kalibračních standardech se známými obsahy přírodních radionuklidů (IAEA, 2003). Následným výpočtem jsou stanoveny kalibrační konstanty. Postup kalibrace je detailně popsán například v publikaci IAEA (2003). Porovnání získaných kalibračních konstant u jednotlivých přístrojů v čase může sloužit k odhalení poruch či k rozpoznání snížení výkonu zařízení. Proto je doporučeno provádět kalibraci jednou ročně, aby byly odstraněny i změny měření způsobené vlivem stárnutí přístroje. V Čechách jsou kalibrační standardy ve Stráži pod Ralskem (Matolín et al., 2010).

U detektorů je jedna ze stěžejních vlastností *citlivost získaná kalibrací přístroje* (IAEA, 2003), která udává vlastní odezvu detektoru. Výsledná hodnota citlivosti je dána počtem detekovaných pulzů v energetickém okně, které jsou přímo úměrné aktivitě daného radionuklidu v čase (IAEA, 2003). Pro terénní měření se udává citlivost detektoru v počtu impulzů za sekundu na jednotkovou koncentraci daného radionuklidu v zemi (IAEA, 2003).

### 3.2.4. Zdroje radiačního pozadí

Při zpracování dat je nutné zavádět opravu na radiační pozadí. Za radiační pozadí lze považovat jakékoli gama záření, jež nepochází ze zemských radioaktivních izotopů (IAEA, 2003). Pozadí nemá žádnou geologickou podstatu, a je tedy nutné toto záření odstranit, aby bylo možné získat přesný záznam o gama aktivitě ze zemské hmoty. Pro měření přírodní radioaktivity existují čtyři základní zdroje radiačního pozadí, které mají vliv na měřená spektra. Jedním z nich je atmosférický radon  $^{222}\text{Rn}$  a jeho dceřiné produkty (Grasty, Minty, 1995). Ten se pomocí proudění vzduchu může bez problémů přenášet a měnit svou koncentraci vlivem atmosférických změn. Tento plyn uniká do prostředí z půdy a hornin a může docházet k jeho akumulaci nebo naopak k různým změnám jeho koncentrace ve vzduchu. Radon může mít velký vliv na přesnost měřených hodnot vlivem koncentrace v místě měření (Minty, 1997). Druhým aspektem je radiace okolního materiálu. Do tohoto pozadí je započítána jak aktivita přístroje a leteckého zařízení, tak i aktivita antropogenních materiálů (Grasty, Minty, 1995). Třetím aspektem je kosmické záření z vesmíru, jelikož i přes vysokou ochranu atmosférických vrstev na Zem proudí množství vysokoenergetických částic z vnější strany Sluneční soustavy a ze Slunce (Minty, 1997). Ty pak reagují s dalšími částicemi ve vzduchu, s leteckým zařízením i detektorem. Kosmické záření nabývá vyšších hodnot než 3 MeV, a lze tedy bez větších

problémů pozorovat jeho přírůstek a zahrnout jej do celkové kalibrace. Poměr mezi nadmořskou výškou letu a přírůstkem kosmického gama záření je přibližně exponenciální. Je tedy důležité vždy brát v úvahu možný vliv těchto aspektů podle nadmořské výšky bodu měření (Grasty, Minty, 1995). Čtvrtý zdroj pozadí je umělá radioaktivita způsobená testováním jaderných zbraní nebo spad z havárií jaderných zařízení. Vliv tohoto dění na Zemi vykazuje nejvíce Cesium. Izotop  $^{137}\text{Cs}$  s poločasem rozpadu 30,08 let se projevuje píkem 0,662 MeV a jeho vliv či pozůstatek jde velmi dobře sledovat (Minty, 1997).

### 3.2.5. Chyby měření v radiometrii

V gamaspektrometrii se obvykle předpokládá, že všechny chyby měření jsou způsobeny náhodnou povahou radioaktivního rozpadu. Množství přeměn atomů v čase je proměnlivé a podléhá náhodnému statistickému chování, které lze popsat pomocí Poissonova rozdělení. Pravděpodobnost (P), že dojde k rozpadu určitého počtu jader atomů je dána funkcí (1) (Mareš et al., 1979).

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \exp(-\bar{n}) \quad (1)$$

$\bar{n}$  střední četnost rozpadů

$n$  počet jader atomů přeměněných v čase

Odchylky od středních hodnot počtu rozpadů jsou standardními odchylkami neboli fluktuacemi, pro které platí, že:

$$\sigma(N) = \sqrt{\bar{N}} \quad (2)$$

$\bar{N}$  střední hodnota počtu impulzů

$\sigma$  standardní odchylka

Směrodatná odchylka se rovná odmocnině počtu pozorovaných impulzů (Minty, 1997). Chybu měření lze snížit snížením pozadí, zvýšením citlivosti detektoru nebo prodloužením doby měření. Při zjišťování a eliminaci chyb se používá zákon o přenášení chyb (Mareš et al., 1979).

## 4. Klasické metody radiometrického průzkumu

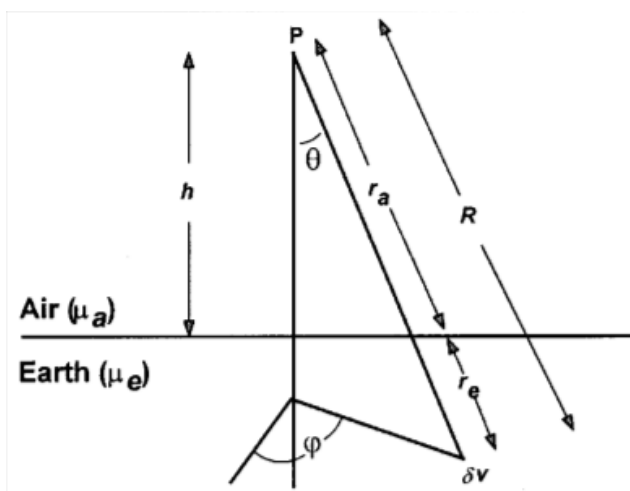
### 4.1. Pilotované letecké prostředky

Mezi klasické metody radiometrického průzkumu patří průzkum konaný pilotovanými vzdušnými leteckými prostředky, jako jsou letadla nebo vrtulníky. Tyto prostředky jsou

výhodné pro měření rozsáhlých ploch v krátkém čase. Obvyklá výška měření se pohybuje od 40 m do 100 m, s rychlostí letu okolo 50 m/s (IAEA, 2003). Letecké spektrometry jsou obvykle vyrobené z NaI(Tl) scintilačního krystalu. Celkový detektor se skládá nejméně ze dvou scintilačních krystalů o objemu 16,4 l (IAEA, 2003). Zpracování dat letecké gama spektrometrie je standardizovaný proces, který byl popsán např. v publikaci IAEA (2003).

#### 4.2. Pole gama záření nad povrchem země a výška letu

Výška letu se volí s ohledem na reliéf krajiny, bezpečnost letu a možnosti letounu tak, aby bylo docíleno optimálního pokrytí měřené plochy. Při měření nad zemí je detekováno gama záření vyzařované ze země pod detektorem. Tento zdroj je obvykle modelován jako nekonečná zdrojová deska (IAEA, 2003). Pokud měříme ve výšce 100 m, pochází méně než 40 % záření ze zdroje o poloměru 100 m a více než 20 % pochází ze vzdálenosti větší než 300 m (IAEA, 2003). Dosah gama paprsků je, vlivem vzdálenosti od povrchu a díky průchodu vzduchem, oslaben. Výpočet gama záření ve výšce  $h$  ve dvouvrstvém prostředí s konstantní hustotou a konstantním rozložením radionuklidů v zemi a s konstantní hustotou a absencí radioaktivních izotopů ve vzduchu je popsán vztahem (3) (Mareš et al., 1979). Geometrie zdroje a detektoru je znázorněna na obr. 2.



Obr. 2: Geometrie zdroje a detektoru pro dvouvrstevný model země-vzduch.  $H$  je výška detektoru nad povrchem,  $P$  zobrazuje pozici detektoru a  $\mu$  je koeficient lineárního zeslabení gama záření (IAEA, 2003).

Intenzita gama záření nad povrchem nekonečného homogenního poloprostoru (horninové prostředí) v absorbujícím prostředí (vzduch) ve výšce  $h$  nad povrchem homogenního poloprostoru je popsána vztahem (Mareš et al., 1979):

$$I = \frac{2\pi k Q \rho}{\mu_1} E_2(\mu_2 h) \quad (3)$$

$Q$  hmotnostní koncentrace radioaktivního prvku ve zdroji

$\rho$  hustota zdroje

$E_2$  Integrálně exponenciální funkce druhého řádu

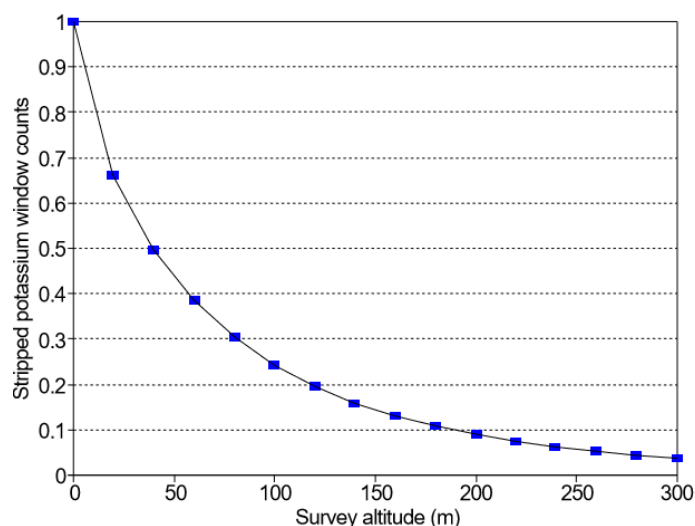
$\mu_1, \mu_2$  Lineární součinitele zeslabení gama záření v prostředí 1 (zem,  $\mu_1$ ) a v prostředí 2 (vzduch,  $\mu_2$ )

Integrálně exponenciální funkce druhého řádu  $E_2$  vyjadřuje pohlcení záření gama v absorbujícím prostředí nad nekonečným poloprostorovým zdrojem (dvouvrstevný model). Klesající funkce  $E_2$  je definována vztahem (Mareš et al., 1979):

$$E_2(x) = e^{-x} - x \int_x^\infty e^{-t} \frac{1}{t} dt \quad (4)$$

$$t = x \sec \varphi$$

Vliv na lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu má hustota vzduchu mezi detektorem a zemským povrchem, která je funkcí teploty vzduchu a úrovně tlaku v atmosféře (Grasty, Minty, 1995). Úbytek intenzity pole gama záření nad homogenním poloprostorem má přibližně exponenciální tvar, jak je vidět na obr. 3, kde je zobrazen úbytek intenzity pole gama záření pro energii 1,46 MeV (Grasty, Minty, 1995). Pro zdroj konečné velikosti (radioaktivní anomálie) velmi závisí úbytek intenzity gama záření s výškou na velikosti zdroje (Mareš et al., 1979).



Obr. 3: Úbytek intenzity pole gama záření nad homogenním poloprostorem. Na vertikální ose je vyznačena změna úbytku impulzů v energetickém okně draslíku v poměru k změně výšky měření od povrchu na horizontální ose (Grasty, Minty, 1995).

#### 4.3 Pozemní průzkum

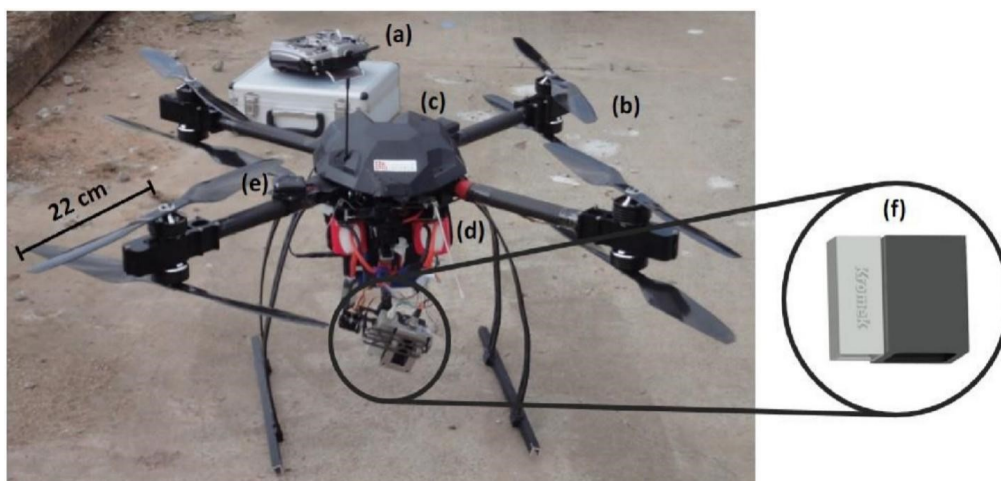
Další z klasických metod je pěší průzkum. Pěší průzkum je obvykle vykonáván jednou osobou, která nese a ovládá přístroj. Pěší průzkum se používá pro menší, prostorově omezené plochy, dále jako doplňkový průzkum, popřípadě pro přesnou lokalizaci anomálií. Měření je závislé na výšce měření, jelikož dosah detekce, jak udává Mareš et al. (1979), roste s prostorovým úhlem záření. Měření může být prováděno na zemi, nad povrchem, konané na podstavci i pod povrchem, a to v jamkách hlubokých první desítky centimetrů. Spektrometrie se provádí nejčastěji scintilačními počítači s NaI(Tl) nebo BGO krystalem s maximálními rozměry  $80 \times 80$  mm a s hmotností 4 až 7 kg. S ohledem na přesnost a ekonomiku daného měření se doba měření na jednom bodě pohybuje od 2 do 15 minut. Pro detektor NaI(Tl) s objemem  $350 \text{ cm}^3$  se čas měření obvykle pohybuje od 2 min pro vysoce radioaktivní horniny do 6 min pro horniny s nízkou radioaktivitou (IAEA, 2003). I přes celkovou časovou náročnost měření, lze dosáhnout velmi detailního obrazu rozložení radioaktivních prvků v prostředí (Mareš et al., 1979).

### 5. Nepilotované letecké prostředky pro radiometrický průzkum

Bezpilotní letecké prostředky se nejprve začaly využívat v sedmdesátých letech v armádním výzkumu. Ve snaze minimalizovat škody na lidských životech byl hledán vhodný stroj pro náročné průzkumné práce (Kim et al., 2016). Tyto prostředky byly v armádě používány



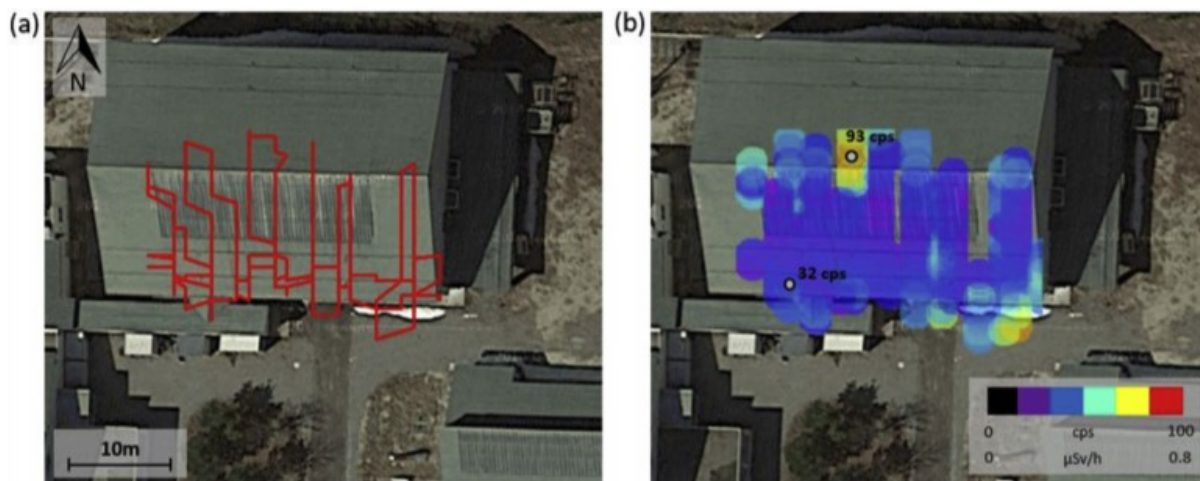
převážně jako střelecké cíle a průzkumné prostředky (Everaets, 2008). Do civilního sektoru se dostaly spolu se záchrannými systémy na pomoc záchranářům, horské službě či hasičům a nezdá se, aby byly nápomocny i při různých policejních vyšetřováních (Kim et al., 2016). Postupně se bezpilotní letecké prostředky začaly dostávat do dalších odvětví, kde našly své využití, jako například v zemědělství, ve vědě nebo při výzkumu, kde slouží kupříkladu při geofyzikálních nebo radiometrických průzkumech (Kim et al., 2016). V posledních letech došlo u těchto prostředků k velkému vývoji a rozmohla se celá řada různých druhů (Everaets, 2008). Bepilotní zařízení je vyrobeno z co nejlehčích, ale zároveň pevných a odolných materiálů. V současnosti existují různé velikosti těchto zařízení, přičemž největší slouží pouze vojenským účelům, menší pak účelům civilním nebo vědeckým (Corrigan, 2018). Tyto prostředky mohou mít podobu klasických letadel s připevněnými křídly, nebo ramena s vrtulemi, či propojení obou těchto možností (Corrigan, 2018). Může se jednat o bezpilotní helikoptéru, která je znázorněna na obr. 6 (Inoue et al., 2014). Dalším příkladem jsou bezpilotní vzducholodě vyobrazené na obr. 7 (Jon et al., 2013). Výjimkou nejsou ani bezpilotní prostředky o velikosti pouhých několika centimetrů (Corrigan, 2018). Jejich váha, která se může pohybovat od pouhého 0,5 kg až po 1 tunu, je zásadní pro výslednou nosnost tohoto zařízení, doletovou vzdálenost a rychlost letu (MacFarlane et al., 2014). Na obr. 4 je vyobrazena jedna z používaných bezpilotních multikoptér (Martin et al., 2016a).



*Obr. 4: Jedná se o multikoptéru vyvinutou na univerzitě v Bristolu. Na obrázku jsou písmeny označeny jednotlivé části celého přístroje (a) Jednotka dálkového ovládání, b) Otočná vrtule vyrobená z uhlíkových vláken, c) Kryt z plastu chránící řídicí systém, d) Lithium polymerové baterie, e) Jednotka GPS, f) Detekční systém sestávající z postranního mikro gama spektrometru (vlevo) a jednobodového laserového dálkoměru (vpravo) (Martin et al., 2016a).*

Bezpilotní letecké prostředky mají, oproti klasickým metodám měření, řadu výhod. Umí se nejen snadno pohybovat za cílem měření, ale rovněž na vytyčeném místě přistát a získávat údaje ze zemského povrchu (Martin et al., 2016b). Veškeré tyto pohyby a samotné řízení lze provádět s využitím GPS systému a také díky správnému nastavení, buď poloautomaticky, zcela automaticky po libovolném profilu, anebo jej lze snadno ovládat pomocí radiových vln joystickem (Boudergui et al., 2011; Nex, Remondino, 2013). Oproti klasickému leteckému měření je měření za pomoci bezpilotních prostředků také o mnoho ekologičtější a šetrnější pro životní prostředí (Inoue et al., 2014). Jejich výhoda tkví i v možnosti měření v místech se zvýšenou radioaktivitou, například po jaderných nehodách, a to bez nebezpečí dopadu radiace na člověka (Martin et al., 2015). S bezpilotními prostředky lze vytvářet pomocné mapy (obr. 5), díky kterým je možné stanovit oblasti se zvýšenou intenzitou radioaktivního záření a identifikovat a kvantifikovat stupeň kontaminace (Martin et al., 2015). Další výhodou těchto prostředků je, že jejich detektorům nestíní nic v přijímání záření z kompletního profilu (Martin et al., 2015). Pokud jde osoba s detektorem, mohou být výsledky jemně ovlivněny chybou způsobenou odstíněním radioaktivní oblasti obsluhovatelem ručního detektoru. Osoba obsluhující detektor může zachytit a utlumit až 30 % gama paprsků, které by, za pomoci detektorů bezpilotních prostředků, mohly být detekovány (Martin et al., 2015). Nevýhodou

měření za pomoci těchto prostředků je nízká doba letu na jedno nabití, popřípadě na jednu nádrž paliva. Rovněž je třeba dbát na atmosférické změny, zejména na povětrnostní podmínky (Nex, Remondino, 2013).



Obr. 5: a) Dráha letu UAV nad budovou. b) Zachycená intenzita záření (v počtu impulzů za sekundu, CPS) v 1 m nad povrchem (Martin et al., 2016a).

### 5.1. Hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A od firmy „Georadis“

Jedním z posuzovaných bezpilotních leteckých prostředků je hexakoptéra „Kingfisher“ od firmy „Robodrone Industries“. Jedná se o plně autonomní bezpilotní letecký prostředek s rozměry  $120 \times 140 \times 22$  cm. Tato hexakoptéra dosahuje hmotnosti 4 kg. Její hraniční nosnost je 5 kg, díky čemuž k ní lze připojit další užitečné zařízení (Robodrone Industries, 2018). Maximální doba letu této hexakoptéry je okolo 45 minut. Jestliže je k ní připojeno užitečné zařízení se zatížením 4 kg, její doba letu se sníží na 16 minut. Toto zařízení je schopno létat rychlostí až 70 km/h a odolá větru o síle 10 m/s (Robodrone Industries, 2018).

Měřicí aparatura tvořená hexakoptérou „Kingfisher“ s detektorem D230A byla použita k měření přírodního radioaktivního záření například v rámci studie Šálek et al. (2018). Užitý detektor D230A je 1024 kanálový gamaspektrometr od české firmy „Georadis“. Jde o scintilační detektor, který obsahuje dva scintilační BGO krystaly, každý s objemem  $103 \text{ cm}^3$ . Společně s dobíjecími bateriemi a duralovým držákem váží přibližně 4 kg. Pro detektor D230A bylo experimentálně stanoveno energiové rozlišení 13,6 % pro pík  $^{137}\text{Cs}$ , který odpovídá 662 keV (Šálek et al., 2018). Citlivost tohoto detektoru byla stanovena na 0,55 imp/s na 1ppm eU pro geometrii měření na zemi (Šálek et al., 2018).

### 5.2. Oktokoptéra „Arducopter“ s detektorem GR1 od firmy „Kromek“

Dalším z vybraných bezpilotních leteckých prostředků je oktokoptéra „Arducopter“ (Martin et al., 2016b). Tato oktokoptéra je schopna zcela autonomního letu, včetně nastavení úrovně nadmořské výšky (APM COPTER, 2018). Schematické rozložení tohoto bezpilotního prostředku je zobrazeno na obr. 4. Toto UAV je nesené pomocí osmi motorů se stejným počtem vrtulí nad a pod jednotlivými rameny. Výška od okrajů vrtulí je 0,4 m a šířka 1,2 m. S hmotností 7 kg je toto UAV poháněno lithiem polymerovými bateriemi, které s úplným nabitím dovedou létat po dobu 30 až 35 minut plného výkonu. Maximální zatížení tohoto prostředku je 5 kg. Aby se však docílilo delšího letu, doporučuje se váha užitečného zatížení do 0,5 kg (Martin et al., 2016b).

Měřicí aparatura tvořená oktokoptérou „Arducopter“ a detektorem GR1 byla použita k měření například v rámci výzkumu Martin et al. (2016a). Detektor GR1 o hmotnosti 6 gramů od firmy „Kromek“ je tvořen polovodičovým krystalem CTZ (CdZnTe) (Kromek, 2018). Systém GR1 shromažďuje spektrum ze 4096 kanálů. Lze jej snadno připojit přes USB port a pomocí USB je i napájen. Detektor GR1 využívá ko-planární síťový detektor CTZ s objemem 1 cm<sup>3</sup>. Uvnitř přístroje je signál z detektoru CZT upravován a digitalizován. Digitalizovaná data jsou poté přenesena do počítače. Pro dosažení co nejkvalitnějších výsledků je třeba před sběrem dat přístroj ponechat několik minut stabilizovat (Kromek, 2018). Pomocí GPS je detektor GR1 schopen zaznamenat na každém místě měření, v intervalu 500 ms, velmi přesnou polohu ( $\pm 0,5$  m) (Martin et al., 2016b). Citlivost detektoru GR1 při detekci přírodních radionuklidů dosahuje přibližně 1/300 citlivosti detektoru D230A (Šálek et al., 2018). V geometrii měření na zemi by citlivost tohoto detektoru odpovídala hodnotě okolo 0,002 imp/s na 1 ppm eU.

### 5.3. Helikoptéra „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl)

Bezpilotní helikoptéra „RMAXG1“ japonské společnosti „Yamaha“ byla původně určena pro potřeby zemědělství k postřikování plodin na polích (Sanada, Torii, 2015). Tato helikoptéra má hmotnost 94 kg a je schopna nést až 10 kg zátěže. Její maximální rychlost je 72 km/h a na jednu nádrž paliva dovede létat až 1,5 hodiny. Startování a vzletání je třeba ovládat ručně, jelikož není schopna létat autonomně. Dráha a rychlost letu již lze naprogramovat pomocí GPS souřadnic. Celý systém komunikuje s pozemní stanicí pomocí radiových vln na frekvenci 2,4 Ghz (Sanada, Torii, 2015).



Obr. 6: Bezpilotní helikoptéra „RMAXG1“ vyrobená firmou „Yamaha“ (Inoue et al., 2014).

V rámci studie, jejímiž autoři jsou Sanada a Torii (2015), byla helikoptéra „RMAXG1“ použita k radiometrickému měření za pomoci detektoru LaBr<sub>3</sub>:Ce, který však není vhodný pro měření přírodních radionuklidů (Šálek et al., 2018). V této práci byla tato helikoptéra uvažována v kombinaci s detektorem NaI(Tl) s vhodným objemem a hmotností s ohledem na nosnost aparatury. Hmotnost detektoru byla odvozena z hmotnosti již zmíněného detektoru LaBr<sub>3</sub>:Ce, který vážil 6,5 kg (Sanada, Torii, 2015). Za pomoci vztahu mezi objemem  $V$ , hmotností  $m$  a hustotou  $\rho$ , tedy  $V = \frac{m}{\rho}$ , byl spočítán objem uvažovaného detektoru NaI(Tl). Vzhledem k tomu, že hmotnost byla stanovena na 6,5 kg a hustota NaI(Tl) je 3,66 g/cm<sup>3</sup>, výsledný objem vhodného detektoru je 1,8 l.

Dále bylo třeba odhadnout, jaké by detektor NaI(Tl) o objemu 1,8 l dosahoval citlivosti. Citlivost byla odhadnuta za pomoci v literatuře uvedených hodnot parametrů detektorů používaných pro klasické letecké měření a pozemní měření. Konkrétně se jednalo o leteckou aparaturu s detektorem NaI(Tl) o objemu 32 l, která ve výšce 80 m dosahuje citlivosti 8 imp/s na 1 ppm eU (IAEA, 1991) a detektor NaI(Tl) o velikosti 76,2 × 76,2 mm, s objemem 0,35 l a citlivostí 0,32 imp/s na 1 ppm eU v geometrii měření na zemi. Tato hodnota citlivosti pro U odpovídá gama spektrometru GS-256 PřF UK kalibrovanému na kalibrační základně ve Stráži pod Ralskem. Při odhadu citlivosti se vycházelo ze zjednodušujícího předpokladu lineárního vztahu mezi objemem detektoru a jeho citlivostí. Citlivost detektoru NaI(Tl) o objemu 1,8 l byla odhadnuta podle klasického leteckého detektoru pro geometrii měření na zemi na 1,2 imp/s na 1 ppm eU a podle detektoru NaI(Tl) s objemem 0,35 l na 1,6 imp/s na 1 ppm eU. Pro

konečnou hodnotu citlivosti byly výsledky odvozené z obou způsobů měření zprůměrovány. Pro uvažovaný detektor helikoptéry „RMAXG1“ byla výsledná hodnota citlivosti odhadnuta na 1,4 imp/s na 1 ppm eU v geometrii měření na zemi.

Pro zjištění citlivosti detektoru v pracovní výšce byla vynásobena hodnota citlivosti v geometrii měření na zemi hodnotou  $E_2$  pro výšku 40 m nad povrchem, které odpovídá číselná hodnota 0,545. Hodnota funkce  $E_2$  pro danou výšku detekce byla vypočtena pro lineární součinitel zeslabení  $0,0056 \text{ m}^{-1}$  podle vzorce (4) za pomoci funkce expint v programu Matlab. Citlivost detektoru NaI(Tl) o objemu 1,8 l ve výšce 40 m nad zemí byla odhadnuta na 0,8 imp/s na 1 ppm eU (viz. Tabulka 2).

#### *5.4. Vzducholod' „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl)*

Posledním z vybraných bezpilotních leteckých prostředků je vzducholod' „ACC15X“ od české společnosti „AirshipClub“ (AirshipClub, 2012). Bepilotní vzducholodě prozatím nebyly použity pro radiometrický průzkum, nicméně uvedená vzducholod' má letové charakteristiky, které ji činí pro tuto oblast perspektivní. Délka vzducholodě „ACC15X“ dosahuje 12 m s průměrem v nejširší části okolo 2,8 m. Hmotnost vzducholodi je 1-3 kg (AirshipClub, 2012). Celé nosné těleso je vyplněno heliem s objemem  $57 \text{ m}^3$  (Jon et al., 2013). Vzducholod' je schopna plně autonomního letu. Na plnou nádrž při provozní vzdušné rychlosti dovede létat až 3 hodiny. Nosnost vzducholodi je maximálně 15 kg. Měřicí platformu lze vybavit množstvím příslušenství pro potřeby měření. Běžná rychlost je obvykle 30 km/h. Celkově však může vzducholod' dosáhnout rychlosti až 50 km/h a letět ve výšce 1000 m nad zemí (AirshipClub, 2012). Výrobce v elektronické komunikaci ze dne 7. 6. 2016 uvádí bezpečnou výšku za standardních podmínek okolo 80 m nad povrchem.

Zdrojem energie je spalovací dvoutaktní motor pohánějící alternátor. S celým zařízením je pohybováno za pomoci dvou bočních elektromotorů, které lze, v případě potřeby, napájet ze záložní baterie. Nosníky s vrtulemi jsou umístěny na plášti v úrovni osy vzducholodě. Vzducholod' je osazena virtuálním balonem, který udržuje požadovaný přetlak balónu nezávisle na letové výšce. V případě neočekávané poruchy nebo při dysfunkci motoru dojde, díky rozdílu v hmotnostech helia a vzduchu, k plynulému klesání bez ohrožení vybavení (AirshipClub, 2012). Vysoká stabilita letu a možnost letu při nízkých rychlostech umožňuje přesné měření i na příkrých svazích a hůře dostupných plochách (Jon et al., 2013). Velká nevýhoda této vzducholodi je nízká odolnost proti větru. Nad zástavbou je pro nasazení



vzducholodi povolená maximální rychlost větru 3 m/s a v otevřených prostorech 4 m/s (AirshipClub, 2012).



Obr. 7: Bezpilotní vzducholod' „ACC15X“ (Jon et al., 2013).

Vzhledem k tomu, že vzducholod' „ACC15X“ prozatím nebyla použita pro radiometrická měření, bylo třeba k ní uvažovat NaI(Tl) detektor o vhodné hmotnosti a objemu. Na základě její nosnosti byla odhadnuta vhodná hmotnost detektoru na 10 kg. Objem detektoru byl opět odvozen ze vztahu  $V = \frac{m}{\rho}$ , kde uvažovaná hmotnost je 10 kg a hustota NaI(Tl) je 3,66 g/cm<sup>3</sup>. S uvedenými parametry by měl detektor, který by byl vhodný pro připojení ke vzducholodi „ACC15X“, objem 2,7 l. Při výpočtu citlivosti se opět vycházelo ze zjednodušujícího předpokladu lineárního vztahu mezi citlivostí detektoru a jeho objemem. Citlivost detektoru NaI(Tl) o objemu 1,8 l byla odvozena z citlivostí a objemů již zmíněných detektorů NaI(Tl) používaných pro klasické letecké měření (objem 32 l, 8 imp/s na 1 ppm eU ve výšce 80 m nad zemí) a pozemní měření (objem 0,35 l, 0,32 imp/s na 1 ppm eU v geometrii měření na zemi). Citlivost detektoru NaI(Tl) o objemu 2,7 l byla odhadnuta za pomoci srovnání s klasickým leteckým detektorem na 1,9 imp/s na 1 ppm eU a za pomoci srovnání s přenosným detektorem o objemu 0,35 l na 2,5 imp/s na 1 ppm eU. Zprůměrováním těchto dvou hodnot byla citlivost detektoru NaI(Tl) vhodného pro připojení ke vzducholodi „ACC15X“ odhadnuta na 2,2 imp/s na 1 ppm eU pro geometrii měření na zemi.

Pro zjištění citlivosti detektoru ve výšce 80 m nad povrchem byla hodnota citlivosti v geometrii měření na zemi vynásobena hodnotou  $E_2$  pro danou pracovní výšku, které odpovídá číselná hodnota 0,356. Podobně jako u vybrané bezpilotní helikoptéry byla hodnota funkce  $E_2$  pro danou pracovní výšku vypočtena pro lineární součinitel zeslabení  $0,0056 \text{ m}^{-1}$  za pomoci programu Matlab. Hodnota citlivosti tohoto detektoru ve výšce 80 m nad zemí byla odhadnuta přibližně na 0,8 imp/s na 1 ppm eU (viz. Tabulka 2).

## 6. Posouzení možností využití bezpilotních leteckých prostředků pro měření radioaktivního záření

### 6.1. Letové a detekční charakteristiky jednotlivých měřících aparatur

Následující tabulky (Tabulka 1, Tabulka 2) zahrnují vybrané charakteristiky jednotlivých měřících aparatur, včetně parametrů jejich detektorů. Pro posouzení kvality dat získaných jednotlivými zařízeními, s ohledem na různé citlivosti detektorů, různé rychlosti a výšky letu, byl uvažován parametr počtu registrovaných impulzů danou aparaturou na 100 m profilu v okně U nad plochou s koncentrací uranu 1 ppm eU (Tabulka 2). Získání těchto hodnot bylo dosaženo za pomoci hodnoty citlivosti detektoru v pracovní výšce (Tabulka 2) a uvažované rychlosti letu (Tabulka 1).

*Tabulka 1: Shrnutí letových vlastností vybraných měřících zařízení. Písmenem x jsou označeny nezjištěné údaje nebo nevýznamné parametry.*

Typ zařízení	Hmotnost kg	Nosnost kg	Uvažovaná rychlost letu m/s	Doba letu min	Maximální síla větru m/s
UAV „Kingfisher“	4	5	1	16	10
UAV „Arducopter“	7	5	1	35	x
Helikoptéra „RMAXG1“	94	10	5	90	10
Vzducholod’ „ACC15X“	3	15	5	180	3
Klasická letecká aparatura	x	x	50	x	x
Dynamické pozemní měření	x	x	1	x	x



Jak lze vidět v tabulce 1, multikoptéry mají celkově velmi nízkou **hmotnost** (Robodrone Industries, 2018; Martin et al., 2016b). To napomáhá k jejich dynamickému pohybu, snadnému přenosu na požadovanou lokalitu a rychlému nasazení v nouzových případech. Hmotnost vzducholodi je do 3 kg, ovšem pro lepší představu lze uvést i objem nosného balonetu, který činí 57 m<sup>3</sup> (AirshipClub, 2012). Hmotnost bezpilotní helikoptéry „RMAXG1“ je oproti multikoptérám i vzducholodi „ACC15X“ mnohonásobně vyšší (94 kg) (Sanada, Torii, 2015).

V porovnání s klasickou leteckou aparaturou, která může nést detektor o vysokém objemu, mají nepilotované letecké prostředky velmi nízkou **nosnost**. Z tabulky 1 lze vyčíst, že multikoptéry mají nosnost 5 kg, což je nejméně z uvedených bezpilotních prostředků (Robodrone Industries, 2018; Martin et al., 2016b). Helikoptéra „RMAXG1“ a vzducholod’ „ACC15X“ mají nosnost již o něco větší, tedy okolo 10 až 15 kg (AirshipClub, 2012; Sanada, Torii, 2015). Detektory používané společně s bezpilotními prostředky jsou, vzhledem k nižší nosnosti těchto zařízení, méně objemné a mají nižší citlivost, oproti detektorům připojených k pilotovaným letadlům.

Uvažované **rychlosti letu** jednotlivých UAV byly zvoleny tak, aby bylo dosaženo srovnatelné kvality dat, jaké lze docílit za pomoci klasických metod měření. V porovnání s klasickou leteckou aparaturou, jsou UAV schopny létat výrazně nižší rychlostí (AirshipClub, 2012; Sanada, Torii, 2015, Šálek et al., 2018), což jim umožňuje kompenzovat citlivost jejich detektorů, která je výrazně nižší oproti citlivosti detektoru u klasické letecké aparatury. Pro obě multikoptéry byla zvolena rychlost letu 1 m/s, tedy obdobná jako u dynamického pozemního měření. Rychlost vzducholodi „ACC15X“ a helikoptéry „RMAXG1“ byla uvažována vyšší, konkrétně 5 m/s.

Údaje ve sloupci „**Doba letu**“ vypovídají o maximálním času měření pomocí jednotlivých měřících aparatur na jedno nabití, popřípadě na jednu plnou nádrž paliva. Doba letu bezpilotních leteckých prostředků je výrazně nižší než doba letu pilotovaných letounů. Nejdéle by z uvedených UAV dovedla měřit vzducholod’ „ACC15X“, konkrétně okolo 3 hodin (AirshipClub, 2012). Přibližně o polovinu kratší dobu vydrží na jednu nádrž paliva měřit helikoptéra „RMAXG1“ (Sanada, Torii, 2015). Multikoptéry, v porovnání s ostatními prostředky, vydrží nejkratší dobu na jedno nabití. Krátký čas výdrže baterie na jedno nabití se obvykle řeší tím, že se při průzkumu používá více sad (př. šestice) baterií, které se mohou průběžně dobíjet v nabíjecí centrále. Interval pro nabití baterie je přibližně 30 minut. Díky možnosti vyměnit v průběhu měření vybité baterie za nové, je měření více kontinuální (MacFralane et al., 2014).

Údaje ve sloupci „**Síla větru**“ vypovídají o maximální síle větru pro bezpečné užívání jednotlivých měřících aparatur. Vzducholod' „ACC15X“ odolá větru o maximální síle 3 m/s (AirshipClub, 2012), což je pravděpodobně nejméně z uvedených bezpilotních zařízení. Hexakoptéra „Kingfisher“ a helikoptéra „RMAXG1“ jsou schopny bezpečně létat ještě při větru o rychlosti 10 m/s (Kaneko et al., 2011; Robodrone Industries, 2018), což je podstatně více než uvedená vzducholod'. Lze uvažovat, že díky větší hmotnosti a více ramenům bude oktokoptyra „Arducopter“ stejně, možná i více odolná proti větru než uvedená hexakoptéra.

*Tabulka 2: Shrnutí měřících parametrů detektorů uvažovaných pro jednotlivé měřící aparatury v pracovních výškách a při uvažovaných rychlostech letu.*

Typ zařízení	Detektor	Objem l	Pracovní výška m	Citlivost v pracovní výšce Imp/s 1 ppm eU	Citlivost na zemi Imp/s 1 ppm eU	Počet impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU*
UAV „Kingfisher“	D230A BGO	0,2	40	0,25	0,55	25
UAV „Arducopter“	GR1 CTZ	0,001	40	0,0008	0,002	0,08
Helikoptéra „RMAXG1“	Nal(Tl)	1,8	40	0,8	1,4	16
Vzducholod' „ACC15X“	Nal(Tl)	2,7	80	0,8	2,2	16
Klasická letecká aparatura	Nal(Tl)	32	80	8	22,5	16
Dynamické pozemní měření	Nal(Tl)	0,35	0,5	0,32	0,32	32

\* v pracovní výšce za uvažované rychlosti letu

Jak již bylo zmíněno, výsledná kvalita dat hodnocená pomocí počtu impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU závisí nejen na pracovní výšce, ale také na rychlosti letu. Jednotlivé nepilotované letecké prostředky mohou létat podstatně vyšší i nižší rychlostí, než je uvedeno v tabulce 1. S nižší rychlostí je výsledná kvalita dat vyšší. Je však třeba počítat s tím, že aparatury létající nižší rychlostí budou danou oblast měřit déle než prostředky létající rychleji. Následující tabulka vypovídá o tom, jakou vzdálenost dovedou vybrané měřící aparatury uletět za 6 h měření, tedy přibližně za jednu pracovní směnu. Rovněž porovnává, jak dlouhou dobu bude těmto prostředkům trvat změřit 50 km profilu. Jednotlivé číselné hodnoty v tabulce 3 v sobě zahrnují předpokládaný čas potřebný k výměně baterií/doplnění nádrže

paliva a letovým manévřům, tedy přistání a vzletu. U multikoptér bylo předpokládáno zdržení přibližně 15 minut, u vzducholodě „ACC15X“ a helikoptéry „RMAXG1“ 30 minut. Časové údaje u multikoptér jsou podmíněny tím, že se nabíjecí centrála pohybuje společně s dronem, v opačném případě by se mezi nimi zvětšovala vzdálenost, čímž by se zkracoval čas pro měření profilu.

*Tabulka 3: Parametry průzkumu*

Typ zařízení	6 h měření km	Doba pro změření 50 km profilu h	Uvažovaná rychlost letu m/s
UAV „Kingfisher“	12	26	1
UAV „Arducopter“	15	20	1
Helikoptéra „RMAXG1“	80	3,5	5
Vzducholod' „ACC15X“	100	3	5
Klasická letecká aparatura	1080	0,3	50
Dynamické pozemní měření	22	14	1

#### *6.1.1. Hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A*

Detektor D230A o objemu 0,2 l, který tvoří měřicí aparaturu s multikoptérou „Kingfisher“, by ve výšce 40 m nad zemí dosahoval citlivosti 0,25 imp/s na 1 ppm eU. Jak lze vidět v tabulce 2, citlivost detektoru NaI(Tl) u klasické letecké aparatury v 80 m nad zemí je mnohonásobně vyšší, konkrétně 8 imp/s na 1 ppm eU. Za předpokladu, že tato hexakoptéra letí rychlostí 1 m/s, zvládne ve výšce 40 m nad zemí detekovat přibližně o 9 impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou 1 ppm eU více než klasická letecká aparatura s danými parametry. Nevýhodou pomalé rychlosti letu, která dopomáhá k vyšší kvalitě dat, je dlouhá doba potřebná pro změření dané oblasti. Lze uvažovat, že profil dlouhý 50 km, který by klasická letecká aparatura s danými parametry s rychlostí 50 m/s změřila kolem 30 minut, by tato hexakoptéra s rychlostí 1 m/s měřila přibližně 26 hodin, včetně uvažovaného času pro výměnu baterií a letové manévry. Měření by bylo za tento čas uskutečnitelné pouze za předpokladu, že by se základna

s operátorem pro výměnu baterií posouvala po zemi současně s dronem, aby se mezi nimi neprodložovala vzdálenost. Aby tato aparatura ve výšce 40 m nad zemí dosáhla srovnatelné kvality dat, jako klasická letecká aparatura s danými parametry, mohla by zvýšit svou rychlost na 1,5 m/s. Za takových předpokladů by profil dlouhý 50 km měřila přibližně 18 h, včetně uvažovaného času pro výměnu baterií a letové manévry. S hexakoptérou „Kingfisher“ s detektorem D230A by ve výšce 40 m nad zemí a při rychlosti letu 0,75 m/s bylo možné dosáhnout srovnatelné kvality dat jako za pomoci dynamického pozemního měření s detektorem NaI(Tl) o objemu 0,35 l, s rychlostí 1 m/s. Výhodou obou uvažovaných multikoptér je, že ve vhodném terénu mohou létat už v 1 až v 5 m nad zemí (Šálek et al., 2018; Martin et al., 2016a). V takové výšce by bylo možné dosáhnout podstatně vyšší kvality dat než v uvažované pracovní výšce, tedy v 40 m nad zemí. Další výhodou obou multikoptér je, že dokáží odolat poměrně silnému větru, a to o síle až 10 m/s.

#### *6.1.2. Oktokoptéra „Arducopter“ s detektorem GR1*

Detektor GR1 s objemem 0,001 l připevněný k multikoptéře „Arducopter“ má ve výšce 40 m nad zemí mnohonásobně nižší citlivost (0,0008 imp/s 1 ppm eU) než detektor NaI(Tl) s objemem 32 l klasické letecké aparatury v 80 m nad zemí. Ve výšce 40 m a s rychlostí letu 1 m/s lze s touto měřicí aparaturou detekovat 0,08 impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU. Jedná se o nesrovnatelně horší kvalitu dat, než jaké lze dosáhnout za pomoci klasické letecké aparatury ve výšce 80 m a při rychlosti 50 m/s i dynamického pozemního měření s rychlostí 1 m/s. Lze zmínit, že se jedná o nízkou kvalitu dat i v porovnání s ostatními bezpilotními leteckými prostředky v uvažovaných výškách a rychlostech letu. K oktokoptéře „Arducopter“ by, vzhledem k její nosnosti 5 kg, bylo možné připojit detektor o mnohem větším objemu. Díky podobným leteckým parametrům, jaké má hexakoptéra „Kingsfisher“, lze uvažovat, že by za pomoci této oktokoptéry s objemnějším detektorem bylo možné dosáhnout srovnatelné kvality dat jako za pomoci uvedené hexakoptéry. Za její výhodu lze považovat již zmíněnou odolnost proti větru a možnost ve vhodném terénu létat v nižších výškách. Naopak nevýhodou je dlouhý čas potřebný pro změření oblasti související s pomalejší rychlostí letu, která je podmíněná snahou získat co možná nejlepší kvalitu dat.

#### *6.1.3. Helikoptéra „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl)*

Detektor NaI(Tl) o objemu 1,8 l, který byl uvažován pro měření za pomoci helikoptéry „RMAXG1“, by ve výšce 40 m nad zemí dosáhl citlivosti 0,8 imp/s na 1 ppm eU. S rychlostí

5 m/s a ve výšce 40 m by bylo za pomoci této měřicí aparatury možno dosáhnout srovnatelné kvality dat jako prostřednictvím klasické letecké aparatury s detektorem NaI(Tl) o objemu 32 l ve výšce 80 m nad zemí a s rychlostí letu 50 m/s. Za předpokladu letu ve výšce 40 m nad zemí a rychlostí 1 m/s by pomocí této aparatury byla detekována přibližně 1/2 počtu impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU ve srovnání s dynamickým pozemním měřením ve výšce 0,5 m, s rychlostí 1 m/s. Výhodou této bezpilotní helikoptéry je, že oproti klasické letecké aparatuře, je v případě potřeby a ve vhodném terénu schopna létat v podstatně nižší výšce, což by přispělo k vyšší kvalitě dat. Oproti uvedeným multikoptérám dovede tato helikoptéra létat výrazně déle bez nutnosti doplnění nádrže paliva. Profil dlouhý 50 km by s rychlostí letu 5 m/s změřila, i s uvažovaným časem pro doplnění nádrže, přibližně za 3,5 hodiny. Tato helikoptéra je, podobně jako obě multikoptéry, schopna odolat větru o maximální síle 10 m/s.

#### *6.1.4. Vzducholod' „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl)*

Detektor NaI(Tl) o objemu 2,7 l, který byl uvažován pro měření za pomoci bezpilotní vzducholodě „ACC15X“, by ve výšce 80 m nad zemí dosáhl citlivosti 0,8 imp/s na 1 ppm eU. Tato měřicí aparatura by měla být schopna ve výšce 80 m nad zemí, s rychlostí 5 m/s detekovat 16 impulzů na stometrovém profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU, tedy dosáhnout srovnatelné kvality dat jako při měření za pomoci klasické letecké aparatury ve stejné výšce, s rychlostí letu 50 m/s. Oproti dynamickému pozemnímu měření s rychlostí 1 m/s se jedná o poloviční počet impulzů na 100 m profilu v okně U nad plochou s 1 ppm eU. Výhodou vzducholodi oproti multikoptérám je, že díky svému hybridnímu pohonu dokáže létat až 3 hodiny bez přistání. Díky možnosti připojení detektoru o větším objemu dosáhne při rychlosti 5 m/s a ve výšce 80 m srovnatelné kvality dat jako hexakoptéra „Kingfisher“ s méně objemným detektorem, která letí rychlostí 1,5 m/s ve výšce 40 m nad zemí. Zatímco vzducholod' s rychlostí 5 m/s by profil dlouhý 50 km měřila necelé 3 hodiny, multikoptéra s rychlostí 1,5 m/s by na změření takové vzdálenosti potřebovala přibližně 18 hodin. Aby bylo měření s touto vzducholodí bezpečné, je třeba s ní za standardních podmínek létat v minimální výšce 80 m nad zemí. Za nevýhodu této bezpilotní vzducholodi lze považovat, že dokáže odolat větru o maximální síle 3 m/s, což je výrazně méně oproti ostatním bezpilotním prostředkům.

## 7. Závěr

Cílem této práce bylo posoudit možnosti použití bezpilotních leteckých prostředků pro radiometrická měření ve srovnání s klasickým leteckým a pozemním průzkumem. Jednalo se o hexakoptéru „Kingfisher“ s detektorem D230A a oktokopty „Arducopter“ s detektorem GR1. Dále byla zvažována helikoptéra „RMAXG1“ a vzducholod’ „ACC15X“, obě s vhodnými NaI(Tl) detektory.

Výsledky ukázaly, že v porovnání s klasickým leteckým měřením s detektorem NaI(Tl) o objemu 32 l ve výšce 80 m a při rychlosti 50 m/s by srovnatelné kvality dat dosáhla hexakoptéra „Kingfisher“ s detektorem D230A ve výšce 40 m, s rychlostí 1 m/s, helikoptéra „RMAXG1“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) o objemu 1,8 l ve výšce 40 m, s rychlostí 5 m/s a vzducholod’ „ACC15X“ s uvažovaným detektorem NaI(Tl) o objemu 2,7 l ve výšce 80 m, při rychlosti 5 m/s. Jediná letecká aparatura, která by zdaleka nedosáhla srovnatelné kvality dat, je oktokopty „Arducopter“ s detektorem GR1 při měření ve výšce 40 m a rychlosti letu 1 m/s.

V porovnání s vybranou bezpilotní helikoptérou a vzducholodí má hexakoptéra „Kingfisher“ malé rozměry, z čehož by se dalo usuzovat na snadnější manévrovatelnost. Ve vhodném terénu je schopna létat ve výrazně menších výškách, kde je větší intenzita gama záření. Helikoptéra „RMAXG1“ a vzducholod’ „ACC15X“ dovedou oproti hexakoptéře létat mnohonásobně delší dobu na jednu nádrž paliva. Díky citlivějším detektorům mohou tyto prostředky, pro dosažení dané kvality dat, létat výrazně rychleji. Vzhledem k větší rychlosti a méně častým přestávkám pro doplňování nádrže, potřebují, oproti hexakoptéře, mnohonásobně kratší dobu pro změření vybraného profilu. V porovnání s klasikou leteckou aparaturou se však stále jedná o dobu přibližně o řád delší. Ve srovnání s ostatními bezpilotními prostředky má vzducholod’ „ACC15X“ nejmenší odolnost proti větru.

Bezpilotní prostředky mohou rychle měnit směr letu i výšku měření a dostat se do míst, která nejsou pilotovanými letadly zachytitelná a člověku dostupná. Je možné s nimi vzlétat a přistávat na velmi malých plochách a jejich nasazení může být výrazně rychlejší. Jejich výhoda tkví i v možnosti měření v místech se zvýšenou radioaktivitou. Měření za pomoci těchto prostředků má, kromě řady výhod, i své limity. Za hlavní nevýhodu lze považovat, že, ve srovnání s klasickým leteckým měřením, bezpilotní prostředky vydrží létat na jedno nabití nebo na jednu plnou nádrž paliva mnohonásobně kratší dobu (Morgenthal, Hallermann, 2014).

Radiometrické měření za pomoci klasických metod má své nezastupitelné místo. Měření za pomoci bezpilotních leteckých prostředků by však mohlo být vhodným doplňkem, který by svými výhodami vyvažoval limity klasických metod měření.

## 8. Seznam obrázků a tabulek

Obr.1.

Spektrum z měření kvant gama pomocí letecké spektrometrie. Na vertikální ose je zaznamenáno množství naměřených impulzů jednotlivých energií, které jsou vyobrazeny na ose horizontální (IAEA, 2003).

Obr. 2.

Geometrie zdroje a detektoru pro dvouvrstevný model země-vzduch (IAEA, 2003).

Obr. 3.

Úbytek intenzity pole gama záření nad homogenním poloprostorem. Na vertikální ose je vyznačena změna úbytku množství draslíku v jeho energetickém okně v poměru k změně výšky měření od povrchu na horizontální ose (Grasty, Minty, 1995).

Obr. 4.

Bezpilotní letecký prostředek vyvinutý na univerzitě v Bristolu. Na obrázku je znázorněno měřítko a označeny součásti dronu (Martin et. al, 2016a).

Obr. 5.

Mapa s barevným rozložením intenzity záření. Na obrázku je znázorněna dráha letu UAV nad budovou a jsou na něm patrné oblasti s vyšší intenzitou záření (Martin et al., 2016a).

Obr. 6.

Bezpilotní helikoptéra „RMAXG1“ (Inoue et al., 2014).

Obr. 7.

Bezpilotní vzducholod' „ACC15X“ (Jon et al., 2013).

Tab. 1.

Shrnutí letových vlastností jednotlivých nepilotovaných prostředků. Tabulka porovnává významné vlastnosti posuzovaných aparatur, jako je nosnost, uvažovaná rychlost letu, doba měření na plnou nádrž/ plné nabití baterií a minimální výška měření.

Tab. 2.

Shrnutí měřících parametrů detektorů uvažovaných pro jednotlivé měřicí aparatury v pracovních výškách a při uvažovaných rychlostech letu. V tabulce je zaznamenána výsledná kvalita dat získaná od jednotlivých měřících aparatur s uvažovanými leteckými parametry.

Tab. 3.

Parametry průzkumu



## 9. Literatura

- Bogatov, S., Mazny, N., Pugachev, A., Tkachenko, S., Shvedov, A. (2013): Emergency radiation survey device on board the UAV. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-1/W2, S. 51-53.
- Boudergui, K., F. Carrel, T. Domenech, N. Guenard, J. P. Poli, A. Ravet, R. Woo. (2011): Development of a Drone Equipped with Optimized Sensors for Nuclear and Radiological Risk Characterization. *International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and Their Applications*, 1–9.
- Carrel, F., Gmar, M., Lemaire, H., Schoepff, V., Thévenin, M. (2012): GAMPIX: a new generation of gamma camera. *Proceedings of the Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing*, Karlsruhe, Germany, 23–25.
- Carrel, F., Gmar, M., Lemaire, H., Schoepff, V., Thévenin, M. (2010): GAMPIX: a new generation of gamma camera for hot spot localisation. *Proceedings of the ISOE Conference*, Cambridge.
- Corrigan, F. (2018): *How Do Drones Work And What Is Drone Technology*, Drone technology, Knowledge, News & Reviews.
- Everaerts, J. (2008): The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping. *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 37, 1187-1192.
- Finnerty, P., MacMullin, S., Back, H. O., Henning, R., Long, A., Macon, K. T., Strain, J. Linddtrom, R. M., Vogelaar, R. B. (2010): Low-background gamma counting at the Kimballton Underground Research Facility. *Nucl. Instrum. Methods*, A642, 65-69.
- Grasty, R. L., Minty, B. R. S. (1995): A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys: Australian Geological Survey Organization Record, 60.
- IAEA (1991). *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying*. IAEA TRS No. 323. IAEA, Vienna.
- IAEA (2003): *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Vienna.

- Inoue T., Nagai S., Yamashita S., Fadaei H., Ishii R., Okabe K., Taki H., Honda Y., Kajiwara, K., Suzuki R. (2014): Unmanned Aerial Survey of Fallen Trees in a Deciduous Broad-leaved Forest in Eastern Japan. *PLOS One* 9 (10): 109881.
- Jon, J., Koska, B., Pospíšil, J. (2013): Autonomous airship equipped with multi-sensor mapping platform. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5 W 1*, 119 – 124.
- Kaneko, T., T. Koyama, A. Yasuda, M. Takeo, T. Yanagisawa, K. Kajiwara and Y. Honda. 2011. Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan. *International journal of Remote Sensing* 32: 1491–1504.
- Kim, D. H., Lee, B. K., Sohn, S.Y. (2016): Quantifying technology – industry spill over effects based on patent citation network analysis of unmanned aerial vehicle (UAV). *Technological Forecasting and Social Change*, 140 – 157.
- MacFarlane, J. W., Payton, O. D., Keatley, A. C., Scott, G.P.T., Pullin, H., Crane, R. A., Smilion, M., Popescu, I., Curlea, V., Scott, T. B. (2014): Light weight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *J. Environ. Radioactivity*, 127-130.
- Mareš, S. (1979): Úvod do užité geofyziky. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.
- Martin, P. G., Payton, O. D., Fardoulis, J. S., Richards, D. A., Scott, T. B. (2015): The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines, *J. Environ. Radioact.*, 135-140.
- Martin, P. G., Payton, O. D., Fardoulis, J. S., Richards, D. A., Yamashiki, Y., Scott, T. B. (2016a): Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. *J Environ Radioact.* 58–63.
- Martin, P. G.; Moore, J.; Fardoulis, J. S.; Payton, O. D.; Scott, T. B. (2016b): Radiological assessment on interest areas on the sellafeld nuclear site via unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.*, 8, 913.
- Matolín, M., Křest'an, P., Stoj'e, V. (2010): Standardy pro terénní spektrometry gama ve Stráži pod Ralskem.
- Minty, B. R. S. (1997): Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 39–50.

Morgenthal, G., Hallermann, N., (2014): Quality of unmanned aerial vehicle (UAV) based visual inspection of structures: *Advances in Structural Engineering*, 17, no. 3, p. 289–302.

Nex, F., Remondino, F. (2013): UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6, 1–15.

Rasolonjatovo, A. H. D., Shiomi, T., Nakamura, T., Nishizawa, H., Tsudaka, Y., Fujiwara, H., Araki, H., Matsuo, K. (2000): Development of Gamma Ray Monitor Using CdZnTe Semiconductor Detector, *Proceedings of the Second International Workshop on EGS*, 8.-12. August 2000, Tsukuba, Japan KEK Proceedings 200-20, 144-151

Sanada, N., Torii, T. (2015): Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, *J. Environ. Radioact.*, 294–299.

Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L. (2018): Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry, *Journal of Environmental Radioactivity*. 182, 101-107.

Šilar, J. (1960): Scintilační detektory, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 5,1.

AirshipClub (2012): Vzducholodě. [cit. 10.7. 2018]. Dostupné z

<http://www.airshipclub.com/vzducholode.php>

APM COPTER (2018): Arducopter. [cit. .05. 2018]. Dostupné z <http://www.arducopter.co.uk/>

Kromek (2018): User guide. [cit. 14.05. 2018]. Dostupné z

[http://www.kromek.com/images/download1/GR1\\_User\\_Guide.pdf](http://www.kromek.com/images/download1/GR1_User_Guide.pdf)

Robodrone Industries (2018): Popis zařízení. [cit. 09.05. 2018]. Dostupné z

<https://www.robodrone.com/kingfisher>